

生态知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

研究报告

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM_{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘颗粒物携带金属元素的来源与健康风险评价 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 杜沛, 王建州 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛潇萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe₂O₄ 的制备及其吸附水中磷的性能 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N₂O 排放的影响 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域生态空间管控下生境监测方法概述 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向

王丽莎^{1,2}, 李希^{1*}, 李裕元¹, 张满意¹, 吴金水¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以亚热带丘陵区为研究区,采取野外定位观测的研究方法,选取耐高氮(N)、磷(P)的绿狐尾藻为湿地植物,建立稻草基质池+6级绿狐尾藻表面流湿地系统,湿地总面积1 597 m²,水力负荷0.06~0.14 m³·d⁻¹,水力停留时间31 d,研究此湿地系统对养猪废水(NH₄⁺-N:535.4~591.09 mg·L⁻¹、TN:682.09~766.96 mg·L⁻¹、TP:57.73~82.29 mg·L⁻¹和COD:918.4~1 940.43 mg·L⁻¹)的治理效果,旨在为亚热带高负荷猪废水的生态治理提供参数依据。结果表明,湿地系统对NH₄⁺-N、TN、TP和COD的平均去除率为97.4%、97.1%、91.0%和90.2%,其中以CW1累积贡献率最大(37.3%、38.4%、43.3%和27.4%)。植物N、P吸收量在23.87~79.96 g·m⁻²和5.34~18.98 g·m⁻²之间,占湿地N、P去除量的19.1%和20.2%;底泥N、P吸附量在19.17~56.62 g·m⁻²和10.59~26.62 g·m⁻²之间,占去除量的19.8%和61.7%。湿地N、P去除率与影响因子间的关系表明,环境因子解释了湿地N、P去除率的79.9%和70.1%。其中,DO是湿地系统N去除的主要因子,底泥P吸附是P去除的关键。

关键词:养猪废水;植物吸收;底泥吸附;氮磷质量平衡;生态治理

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2021)03-1433-10 DOI:10.13227/j.hjcx.202007073

Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with *Myriophyllum elatinoides* Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China

WANG Li-sha^{1,2}, LI Xi^{1*}, LI Yu-yuan¹, ZHANG Man-yi¹, WU Jin-shui¹

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The loss of nitrogen (N) and phosphorus (P) from aquaculture has caused eutrophication of freshwater systems. Here, surface flow constructed wetland (SFCW) planted with *Myriophyllum elatinoides* were used to treat swine wastewater from a medium-sized hogery in subtropical Central China. Inflow concentrations of NH₄⁺-N, TN, TP, and COD ranged from 535.4 to 591.09, 682.09 to 766.96, 57.73 to 82.29, and 918.4 to 1 940.43 mg·L⁻¹, respectively. The mean removal efficiencies of NH₄⁺-N, TN, TP, and COD were 97.4%, 97.1%, 91.0%, and 90.2%, respectively, and CW1 had the largest contributions of 37.3%, 38.4%, 43.3%, and 27.4%, respectively. Plant N and P uptake ranged 23.87-79.96 g·m⁻² and 5.34-18.98 g·m⁻², accounting for 19.1% and 20.2% of removal, respectively. Sediment N and P accumulation ranged 19.17-56.62 g·m⁻² and 10.59-26.62 g·m⁻², accounting for 19.8% and 61.7% of removal, respectively. Multiple linear regression showed that environmental factors explained 79.9% of the N removal and 70.1% of the P removal; DO was the main factor affecting N removal, and sediment adsorption was the key process in P removal. These results show that *M. elatinoides* constructed wetland can efficiently treat swine wastewater, thereby reduce the discharge of pollutants downstream.

Key words: swine wastewater; plant uptake; sediment accumulation; N and P mass balance; ecological management

全国第二次污染普查公报显示,养殖业每年排放化学需氧量(COD)1 000.53万t、氨氮(NH₄⁺-N)11.09万t、总氮(TN)59.63万t和总磷(TP)11.97万t,占农业面源污染总量的93.8%、51.3%、42.1%和56.5%^[1]。据估算,我国畜禽养殖业年均粪便产生量2.34亿t,尿液产生量1.63亿t,仅有极少数经过无公害处理后排放,养殖废水的随意排放造成了地表水体的严重富营养化^[2]。针对我国养殖业污染现状,为有效解决其污染问题,研发高效低耗的生态治理技术是当前面源污染治理的趋势。

人工湿地已被应用于养殖废水的生态治理^[3,4],由于设计工艺、区域及种植植物的不同,不同地区人工湿地对养殖废水的处理存在差异,如张

彩莹等^[5]在北方地区(郑州)的研究表明,采用齿果酸模(*Rumex dentatus*)和大狼把草(*Bidens frondosa*)构建成潜流人工湿地对稀释养殖废水TN、TP和COD的去除率均达64%以上,植物吸收对N、P去除的贡献为17%和14%;Gaballah等^[6]在亚热带区(巴西库里蒂巴)构建垂直流湿地系统,水浮莲(*Pistia stratiotes*)对N、P的去除率达72.3%和43.7%,植物吸收仅占N、P去除8.5%和6.7%;

收稿日期:2020-07-07;修订日期:2020-08-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800100);国家自然科学基金项目(41601268)

作者简介:王丽莎(1992~),女,博士研究生,主要研究方向为农业面源污染与流域农田环境工程,E-mail:wanglisha@lzb.ac.cn

*通信作者,E-mail:lixixi@isa.ac.cn

Pincam 等^[7]在热带地区(泰国 清迈)种植香蒲(*Typha angustifolia*)构建成水平流湿地处理稀释养殖废水,出水 COD、NH₄⁺-N 和 TP 浓度明显下降,去除率高达 82%、99% 和 80%,植物吸收占湿地 N、P 去除的 20.7% 和 16.4%。因此,植物是影响湿地 N、P 去除的关键,选择合适的植物应成为当前人工湿地研究的重点。但目前研究中,多数植物生物量有限,不耐收割,生态湿地以景观效果为主。

绿狐尾藻(*Myriophyllum elatinoides*)是一种多年生沉水或浮水草本植物,对高 N、P 具有较强的耐受性,可作为养殖废水治理的优选植物^[8~10]。绿狐尾藻在亚热带地区可正常越冬,年均生物量高达 1.5~2.5 t·hm⁻²。绿狐尾藻是一种高粗蛋白、高 P 钙及高维生素类植物,且富含饲料中必需氨基酸和矿物元素,可作为优质畜禽肥料进行产业化开发利用^[11]。在已有研究中,有关绿狐尾藻湿地处理养殖废水实地应用的研究较少,本文通过野外定位观测,研究绿狐尾藻湿地对养殖废水的处理效果,分析污染物去除特征和途径,以期绿狐尾藻湿地生态治理工程的构建提供科学依据和工程参数。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

实验区位于湖南省长沙县金井镇大花村(28°35'25"N、113°17'35"E),该地为典型的亚热带湿润季风气候区,年均气温 17.5℃,无霜期 274 d,降雨量 1 200~1 500 mm。该区养猪业历史悠久,多以农户散养和小规模(存栏 < 1 000 头)养殖为主,2015 年入户调查数据显示,区域内养猪户数占总人

口户数的 62%,其中,120 头以上的小规模养殖场有 100 余个。区域内地表水污染较为严重,全年 TN、TP 为 V 类和劣 V 类水质占总时段 80% 以上,畜禽粪便直排是导致区域水污染的主要原因,占水体 N、P 负荷的 42.2% 和 62%^[2]。

1.2 实验设计

湿地系统采用混凝土防渗,半埋式嵌于约 25° 的坡地上,处理规模化养猪场(1 200~1 500 头存栏)排放废水,日均处理量 27 m³。猪废水通过 PVC 管排入厌氧基质池,沼液流经 6 级湿地,经出口排入临近沟渠。采用水稻土为基质,土壤理化性质: pH 6.3,有机质 18.7 g·kg⁻¹,全氮 1.4 g·kg⁻¹,全磷 0.43 g·kg⁻¹。基质池每 4 个月填充一次稻草,填充量为 10~15 kg·m⁻³;运行前种绿狐尾藻,用苗量为 3~5 kg·m⁻²。系统完全通过地形落差驱动水体流动,无动力系统。该工程于 2015 年 9 月建成,10 月试运行,2016 年 1 月正式运行,设计参数见表 1。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 样品采集

2017 年 4~11 月,每月采集水样、植物样和底泥样一次,每次 3 个重复。

1.3.2 水样测定

NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 AA3 流动分析仪(Fia-star 5000, Foss Tecator, Sweden)测定; TN 采用碱性过硫酸钾消解法测定; TP 采用过硫酸钾法测定; COD 采用重铬酸钾法测定; 测定方法参照文献[12]。采用 Hydrolab 多参数水质分析仪(DS5X)现场测定溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)、pH 和温度(T)。

表 1 绿狐尾藻湿地工程参数¹⁾

Table 1 Engineering parameters of *M. elatinoides* constructed wetlands

设计参数	CW1	CW2	CW3	CW4	CW5	CW6
面积/m ²	194	194	183	270	319	437
有效水深/m	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6
水力负荷/m·d ⁻¹	0.14	0.14	0.14	0.1	0.08	0.06
水力停留时间/d	2.9	2.9	2.7	6	7.1	9.7

1) CW1、CW2、CW3、CW4、CW5 和 CW6 分别代表一级、二级、三级、四级、五级和六级湿地,下同

1.3.3 植物样测定

植物样于 0.5 m×0.5 m 样方内采集长势良好的植株,清洗后于 105℃ 烘箱中杀青 30 min,然后于 80℃ 下烘至恒重。经研磨、过筛(60 目),测定植物 N、P 含量,测定方法为浓硫酸双氧水法, TN 采用 AA3 流动分析仪, TP 采用紫外分光光度计(UV2300)^[13]。

1.3.4 底泥样测定

按照多点采样法采集 0~20 cm 的底泥样。剔除异物混匀后将样品分两份,一份测定 NH₄⁺-N 和

NO₃⁻-N,用硫酸钾浸提后采用 AA3; 另一份风干后研磨,过 100 目筛,测定 TN 和 TP。TN 采用碳氮元素分析仪, TP 用氢氧化钠熔融法测定^[13]。

1.4 数据计算与分析

1.4.1 水样计算公式

污染物输入量 M_1 (g)、输出量 M_2 (g)、拦截量 M_0 (g) 和拦截率 R (%) 计算公式:

$$M_1 = c_i \times Q_i \times D \quad (1)$$

$$M_2 = c_o \times Q_i \times D \quad (2)$$

$$M_0 = M_1 - M_2 \quad (3)$$

$$R = (c_i - c_o) / c_i \times 100\% \quad (4)$$

式中, c_i 为第 i 月进水浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), c_o 为第 i 月出水浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Q_i 为日均污水处理量 (m^3), D 为实验时长 (d).

单位面积 NP 去除量 Q_0 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的计算公式:

$$Q_0 = \frac{V}{t} \times D \times (\bar{c}_i - \bar{c}_o) / S \quad (5)$$

式中, V 为湿地容积 (m^3), t 为水力停留时间 (d), \bar{c}_i 为进水平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), \bar{c}_o 为出水平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), S 为湿地有效面积 (m^2).

1.4.2 植物样计算公式:

植物 N、P 积累量 PA ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 计算公式:

$$PA = (PB_i \times PC_i) \quad (6)$$

式中, PB_i 为第 i 月植物干重生物量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), PC_i 为第 i 月植物 N、P 含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.4.3 底泥样计算公式:

0~20 cm 底泥 N、P 吸收量 Q_2 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 计算公式:

$$Q_2 = \frac{\rho_b \times V \times P / S}{1000} \quad (7)$$

式中, ρ_b 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), V 为 0~20 cm 土壤体积 (m^3), P 为土壤 N、P 含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.4.4 NP 去除的贡献率

贡献率采用多元线性回归分析法, 选取生物量、植物 NP 吸收量、底泥 NP 吸附量、pH、DO、Eh 和水温 (T) 这 7 个影响因子, 判断各因子对 NP 去除的贡献率. 使用 R 语言 VIF 函数进行因子间共线性检验, 使用蒙特卡罗置换 ($T=999$) 检验各因子对 NP 去除率是否具有显著性 ($P < 0.05$). 多元回归分析和蒙特卡罗置换检验分别在 R 语言 lm 函数和 permutest 函数中完成. 多元回归分析和贡献率公式:

$$Y_i = aX_{1i} + bX_{2i} + cX_{3i} \dots \quad (8)$$

表 2 绿狐尾藻 TN 含量¹⁾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 TN content of *M. elatinoides*/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	TN								
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	均值
CW1	58.29±0.49a	50.9±0.62a	58.26±1.04a	63.13±3.39a	66.34±1.09a	52.15±1.11a	63.25±2.84a	72.38±3.65a	60.59±1.78a
CW2	42.4±0.43b	41.58±0.22b	56.29±2.7a	53.52±1.26b	49.26±2.19b	50.12±2.1a	53.36±1.11bc	65.25±1.89b	51.47±1.49b
CW3	37.87±0.44c	30.41±0.19c	52.95±1.4b	51.52±1.22b	50.12±1.17b	50.38±0.89a	55.96±1.33b	59.55±2.04c	48.59±1.09c
CW4	32.46±0.6d	28.52±0.59d	37.94±1.66c	42.32±1.29c	40.35±1.05c	44.26±1.04b	49.25±2.15c	48.99±2.27d	40.51±1.33d
CW5	25.88±1.76f	28.26±0.3d	25.09±1.48e	34.84±0.7d	40.56±1.56c	42.15±1.51b	44.69±1.05d	46.94±1.22d	36.05±1.33e
CW6	29.14±0.58e	23.37±0.36e	34.75±1.69d	40.76±0.41c	39.56±2.35c	44.57±1.66b	45.57±1.17d	48.96±2.08d	38.3±1.29de

1) 数据为平均值 ± 标准差 ($n=3$); 同列标有不同字母的表示其统计差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.1.3 绿狐尾藻 N、P 积累量变化

N、P 积累量的变化范围为 23.87~79.96 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 5.34~18.98 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 4 和表 5), 4~6 月与 8~10 月 N、P 积累量呈增加趋势 ($P < 0.05$), N、P 积累量 4

$$\eta = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| \dots} \quad (9)$$

式中, Y_i 是 NP 去除率, X_{1i} 、 X_{2i} 和 X_{3i} 是影响因子, a 、 b 、 c 为回归系数, η 为因子对 NP 去除的贡献率.

2 结果与分析

2.1 植物吸收特征

2.1.1 绿狐尾藻生物量变化

生物量变化范围在 8.47~17.73 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间 (图 1), 表现为升高-降低-升高-降低的变化趋势, 6、9 和 10 月生物量显著高于 4、8 和 11 月 ($P < 0.05$); 空间上, 均表现为 CW4 或 CW6 生物量最高, CW1 或 CW2 最低, 且湿地系统生物量之间差异不显著 ($P > 0.05$).

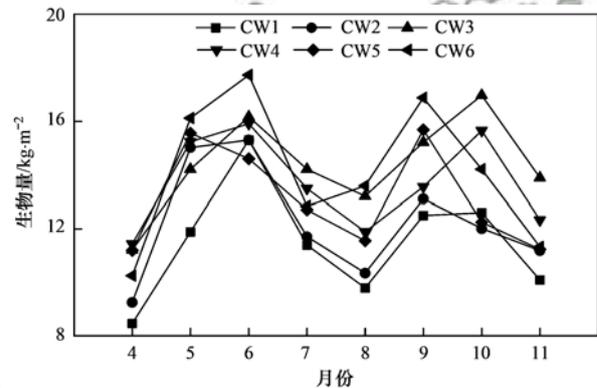


图 1 绿狐尾藻生物量

Fig. 1 Biomass of *M. elatinoides*

2.1.2 绿狐尾藻 N、P 含量变化

N、P 含量变化范围为 23.37~72.38 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 5.95~19.52 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2 和表 3), 随时间表现为降低-升高-降低-升高的趋势, 以 CW1 最高, CW5 或 CW6 最低. N、P 含量 11 月最高, 5 月最低, 两者之间差异显著 ($P < 0.01$), 系统间 N、P 含量也达到差异水平 ($P < 0.05$).

月最低, 10 月最高, 11 月略有下降. CW1、CW2 和 CW3 间 N 积累量差异不显著 ($P > 0.05$), 但高于 CW4、CW5 和 CW6 ($P < 0.05$). 系统间 P 积累量达到显著水平 ($P > 0.05$), 但变化趋势不明显.

表3 绿狐尾藻 TP 含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 3 TP content of *M. elatinoides*/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	TP								
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	均值
CW1	7.81 ± 0.09b	6.84 ± 0.11d	10.45 ± 0.04d	12.34 ± 0.05b	11.56 ± 0.29b	12.55 ± 0.11d	15.74 ± 0.14d	19.52 ± 0.16b	12.23 ± 0.15a
CW2	8.15 ± 0.12a	8.0 ± 0.1a	11.88 ± 0.11a	13.15 ± 0.03a	11.65 ± 0.19a	13.69 ± 0.14a	14.36 ± 0.17a	14.36 ± 0.13a	10.66 ± 0.13a
CW3	7.45 ± 0.17c	7.75 ± 0.09b	11.56 ± 0.2b	12.36 ± 0.04b	14.14 ± 0.27c	13.02 ± 0.20b	18.29 ± 0.22b	18.54 ± 0.05b	13.26 ± 0.16a
CW4	7.24 ± 0.05d	7.25 ± 0.14c	10.28 ± 0.15d	11.91 ± 0.07c	11.39 ± 0.35d	12.22 ± 0.18c	15.98 ± 0.15d	16.66 ± 0.07c	10.62 ± 0.17b
CW5	6.94 ± 0.05e	6.87 ± 0.1d	10.89 ± 0.05c	10.22 ± 0.22d	11.58 ± 0.21e	10.96 ± 0.17d	11.45 ± 0.13c	11.15 ± 0.21d	9.64 ± 0.16bc
CW6	6.87 ± 0.09e	5.95 ± 0.09e	9.66 ± 0.17e	9.78 ± 0.02e	9.13 ± 0.16e	8.39 ± 0.11e	9.83 ± 0.19e	10.51 ± 0.12e	8.39 ± 0.12c

表4 绿狐尾藻 TN 积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ Table 4 TN accumulation of *M. elatinoides*/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$

项目	TN								
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
CW1	39.82 ± 0.33a	54.89 ± 0.66a	71.43 ± 1.23a	70.49 ± 4.22a	63.34 ± 1.09a	64.15 ± 1.11b	77.25 ± 2.84a	71.38 ± 3.65a	
CW2	33.24 ± 0.33b	54.95 ± 0.29a	66.01 ± 3.17b	64.48 ± 1.52b	57.26 ± 2.19b	62.12 ± 2.11b	65.36 ± 1.11b	63.25 ± 1.89c	
CW3	34.11 ± 0.4b	44.66 ± 0.28b	69.64 ± 1.87ab	68.38 ± 4.28b	54.12 ± 1.17b	71.38 ± 0.89a	79.96 ± 1.33a	69.55 ± 2.04b	
CW4	28.46 ± 0.52c	41.99 ± 0.86c	62.7 ± 2.74c	56.9 ± 1.74c	41.35 ± 1.05d	55.26 ± 1.04c	61.25 ± 2.15c	48.99 ± 2.27d	
CW5	24.8 ± 1.69d	35.46 ± 0.58d	40.34 ± 2.38e	41.98 ± 0.84d	48.56 ± 1.56c	43.15 ± 1.51e	45.69 ± 1.05e	44.94 ± 1.22d	
CW6	23.87 ± 0.47d	41.47 ± 0.63c	51.48 ± 2.5d	52.36 ± 0.52c	47.56 ± 2.35c	50.57 ± 1.66d	51.57 ± 1.17d	44.96 ± 2.08d	

表5 绿狐尾藻 TP 积累量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ Table 5 TP accumulation of *M. elatinoides*/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$

项目	TP								
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
CW1	5.34 ± 0.06c	7.37 ± 0.12c	12.8 ± 0.15bc	15.34 ± 0.16b	13.56 ± 0.21a	14.25 ± 0.14ab	17.24 ± 0.12b	15.75 ± 0.33b	
CW2	6.39 ± 0.07b	10.58 ± 0.13b	13.93 ± 0.13b	15.84 ± 0.14b	12.22 ± 0.29b	14.89 ± 0.55a	18.98 ± 1.11a	16.47 ± 0.36a	
CW3	6.71 ± 0.16a	11.38 ± 0.13a	15.21 ± 0.26a	16.4 ± 0.16a	13.58 ± 0.17a	15.21 ± 0.28a	17.89 ± 0.56b	13.22 ± 0.3c	
CW4	6.35 ± 0.05b	10.68 ± 0.16b	11.99 ± 0.25c	14.01 ± 0.1c	12.55 ± 0.35b	14.12 ± 0.34b	14.32 ± 0.25c	12.41 ± 0.18d	
CW5	6.65 ± 0.09a	10.35 ± 0.19b	12.51 ± 0.08bc	12.31 ± 0.27d	12.22 ± 0.35b	13.25 ± 0.35c	14.36 ± 0.36c	11.16 ± 0.26e	
CW6	5.63 ± 0.07e	10.55 ± 0.16b	10.31 ± 0.25d	11.66 ± 0.02e	11.35 ± 0.24c	12.33 ± 0.11d	12.56 ± 0.14d	9.29 ± 0.14f	

2.2 底泥吸附特征

2.2.1 底泥 N、P 含量变化

底泥 NH_4^+-N 、 TN 和 TP 含量时间上逐渐增加, CW1 增加量最大 (217.11、3518.67 和 1431.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 空间上梯级递减, NH_4^+-N 和 TN 在 CW1 递减量最大 (327.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1717.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), TP 在 CW4 递减量最大 (596.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 分别占递减总量的 47.4%、65.4% 和 37.6% (图 2). NO_3^--N 含量随时间变化不大, 系统间差异也不明显 ($P > 0.05$).

2.2.2 底泥 N、P 积累量变化

底泥 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 TN 和 TP 积累量分别在 0.33 ~ 7.11、0.1 ~ 0.34、19.17 ~ 56.62 和 10.59 ~ 26.62 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间 (图 3). NH_4^+-N 和 TN 积累量随时间上升, CW1 积累量显著高于其他系统, 其他系统间也达到显著水平 ($P < 0.05$); NO_3^--N 和 TP 随时间缓慢上升, 但系统间差异不明显 ($P > 0.05$).

2.3 污染物去除效果

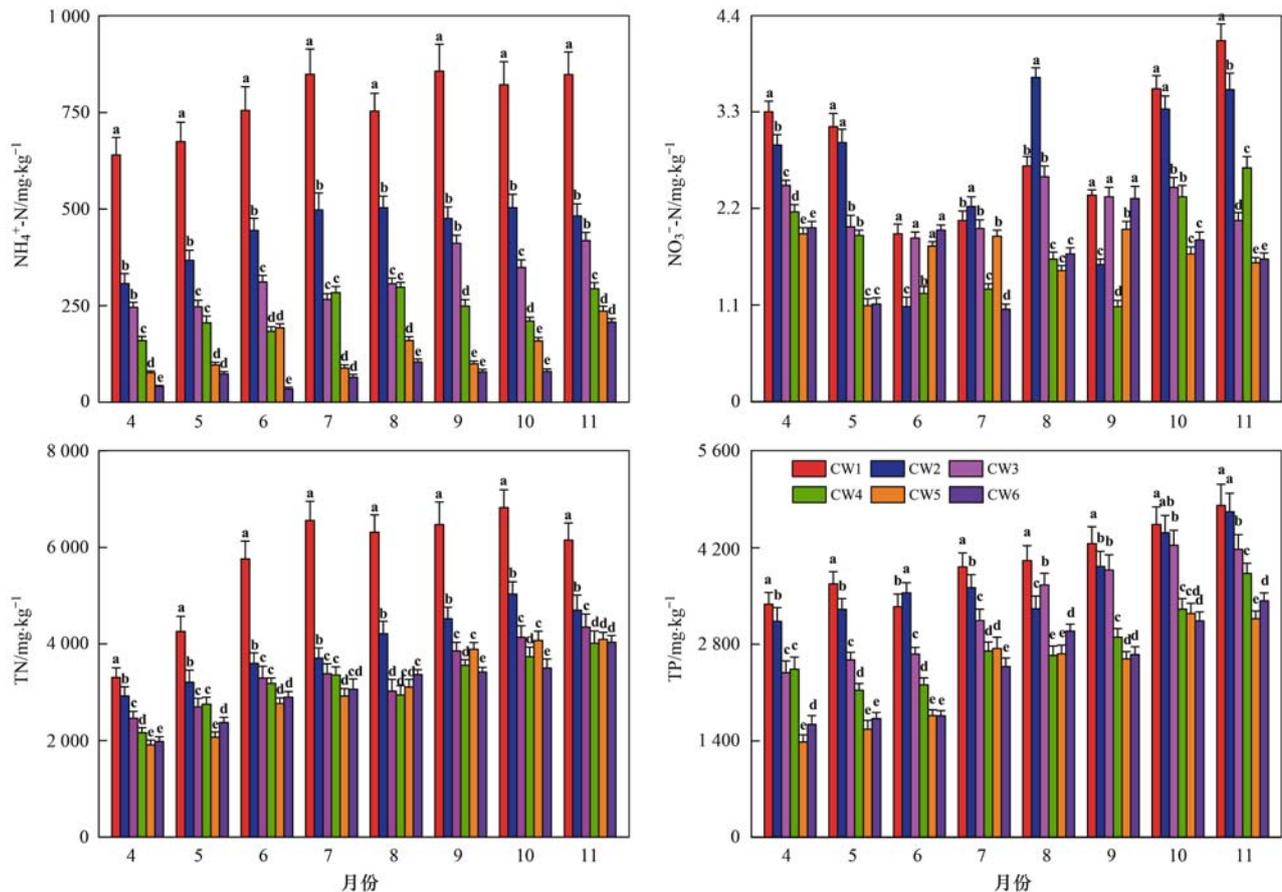
2.3.1 污染物浓度变化

湿地出水 NH_4^+-N 、 TN 、 TP 和 COD 浓度梯级降低 (图 4), 对 NH_4^+-N 、 TN 和 TP 的去除以 5 月最高,

8 月最低, 对 COD 的去除 6 月最高. 污染物平均去除率为 97.4%、97.1%、91.0% 和 90.2%, 平均出水浓度为 14.45、21.75、6.23 和 148.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4^+-N 和 TN 出水可达我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 二级标准, TP 和 COD 出水可达国家《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001). CW1 对污染物去除效果最好, NH_4^+-N 、 TN 、 TP 和 COD 平均去除率为 36.4%、37.3%、39.4% 和 24.9%, 占总去除率的 37.3%、38.4%、43.3% 和 27.4%; 其次是 CW2, 平均去除率为 15.7%、17.9%、23.2% 和 22.3%, 两者出水浓度均显著高于其他湿地出水 ($P < 0.05$).

2.3.2 水环境因子变化

水环境因子变化特征见图 5. DO 和 Eh 的变化范围在 1.14 ~ 4.52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 -2.72 ~ 55.7 mV 之间, 两者均随梯级湿地的增加而增加, pH 和 T 随梯级湿地的增加缓慢降低, pH 变化范围为 6.52 ~ 7.33, 湿地 T 变幅较小, 进出水 T 差值不到 2°C, 系统间 Eh 差异显著 ($P < 0.05$), pH 、 DO 和 T 差异不明显 ($P > 0.05$).



图中数据为平均值 ± 标准差 ($n=3$), 不同小写字母表示其统计差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图2 底泥污染物含量

Fig. 2 Sediment contaminant content

2.3.3 N、P 去除率影响因子分析

选取的因子解释了 N 去除率的 79.9%, P 去除率的 70.1% (图 6). DO (21.18%) 是对 N 去除解释率最大的因子, 其次是生物量 (16.67%)、植物 N 吸收量 (12.01%)、 T (9.85%) 和底泥 N 吸附量 (9.12%), 这些因子对 N 去除的影响达到显著水平 ($P < 0.05$); 对 P 去除率达到显著水平 ($P < 0.05$) 的影响因子是底泥 P 吸附量 (21.35%)、生物量 (12.7%)、植物 P 吸收量 (12.64%) 和 pH (10.24%).

2.3.4 污染物质量平衡

湿地 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD 拦截量分别为 9.92、0.94、7.57 和 18.22 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 拦截率高达 97.1%、91.6%、97.4% 和 89.9% (表 6). 植物吸收 N、P 量为 1.89 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 0.19 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占 N 去除量的 19.1% 和 20.2%, 底泥吸附 N、P 量为 1.96 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 0.58 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占 TP 去除总量的 19.8% 和 61.7%, 植物吸收对 NP 去除的贡献差异不大, 但底泥吸附对 TP 去除的贡献明显高于对 TN 去除的贡献.

表 6 污染物质量平衡

Table 6 Contaminant mass balance

项目	输入量 /kg	输出量 /kg	消耗量 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	消耗率 /%	植物吸收量 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	占比 /%	底泥吸附量 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	占比 /%	其他 /%
TN	3917.5	114.86	9.92	97.1	1.89	19.1	1.96	19.8	61.1
TP	391.12	32.87	0.94	91.6	0.19	20.2	0.58	61.7	18.1
NH ₄ ⁺ -N	2978.09	76.31	7.57	97.4	—	—	—	—	—
COD	7766.69	781.75	18.22	89.9	—	—	—	—	—

3 讨论

3.1 污染物的去除效果及水环境因子分析

绿狐尾藻湿地对养猪废水有很好的治理效果,

污染物平均去除率可达 90% 以上, 出水远优于国家畜禽养殖污水排放标准 (GB 18596-2001). 湿地春秋两季去除率高于夏季 (图 4), Barca 等^[14] 观察到湿地污染物去除率在春季逐渐增加, 夏季降至最低, 秋

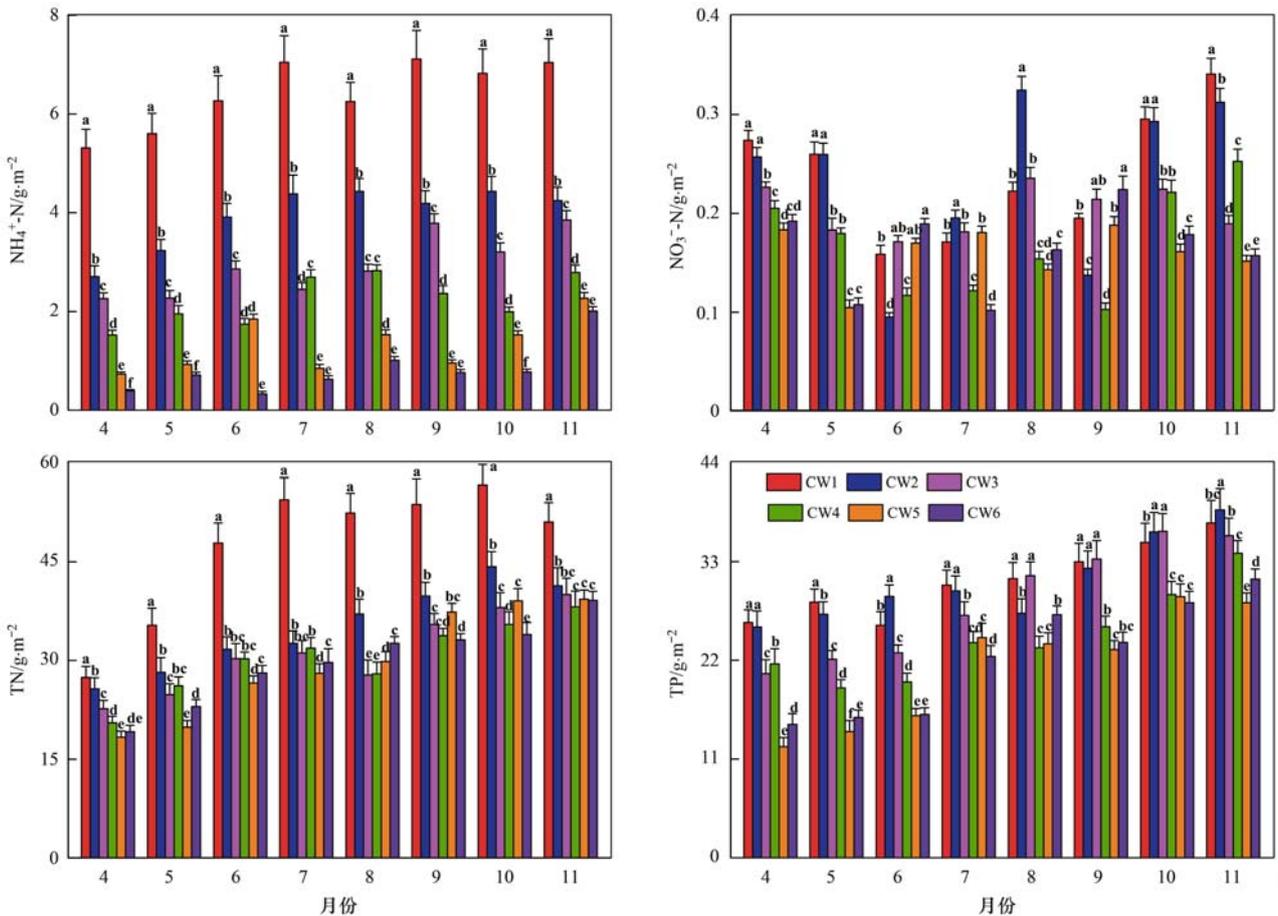


图3 底泥污染物积累量

Fig. 3 Sediment contaminant concentrations

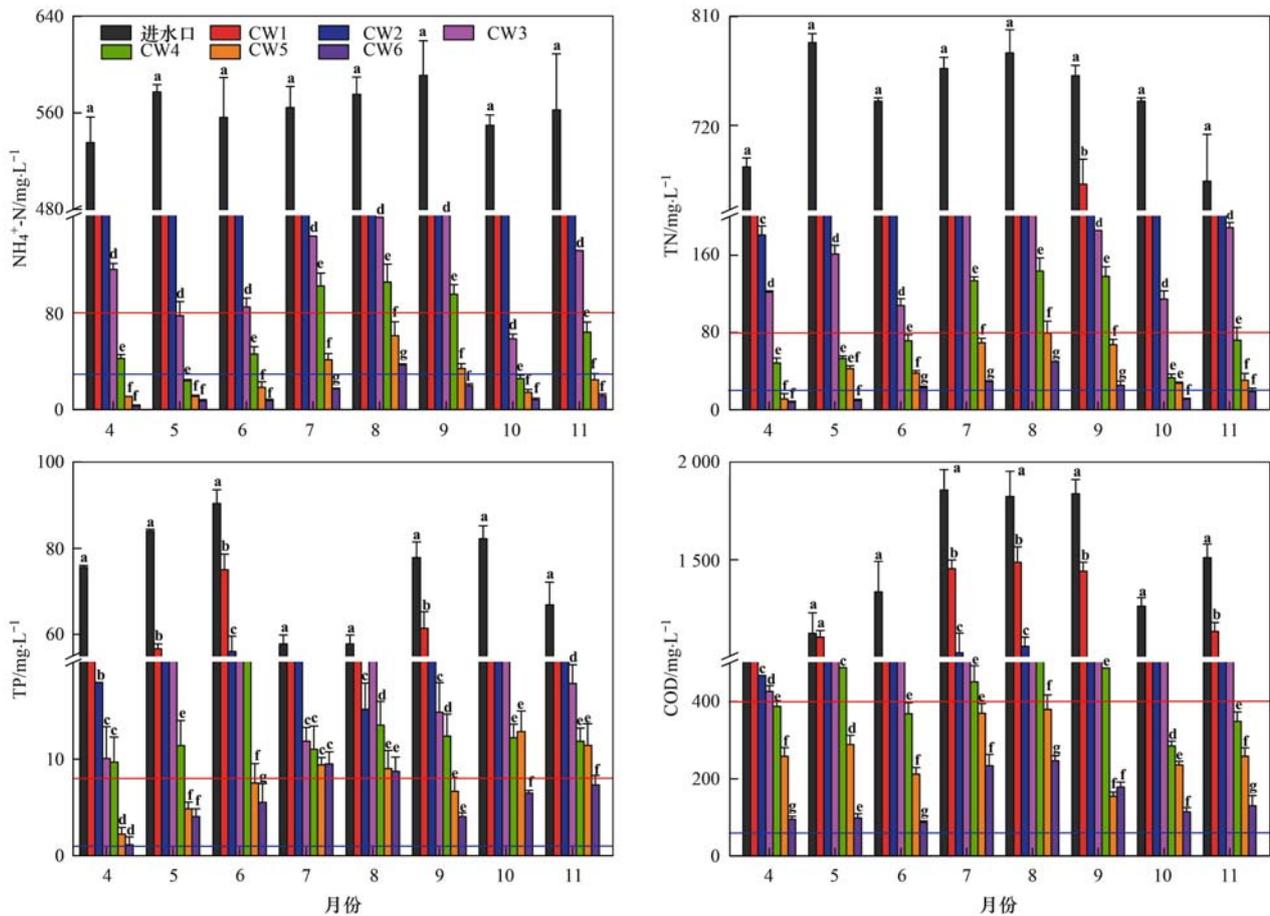
季逐步回升. 高温会抑制水生生物的生长, 影响 DO 浓度和根系微生物数量及活性, 降低去除率^[14,15]. 湿地对 N、P 的去除率与水环境因子密切相关(表 6). 影响湿地 N 去除最大水环境因子是 DO (21.18%, $P = 0.01$), 其次是水温 (9.85%, $P = 0.03$). 有研究表明, 高 DO 浓度可改善水生植物的生长指标, 增加生物量, 并且为硝化进程提供条件 (DO $< 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 硝化进程受抑制)^[16,17], 本研究湿地 DO 浓度范围在 $1.12 \sim 4.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明系统能为 N 硝化提供充足的氧, N 浓度随 DO 的增加而降低(图 4~5); 水温可影响微生物的生长速率和世代更替, 最适硝化反硝化水温为 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 和 $15 \sim 30^\circ\text{C}$ ^[16-18], 本湿地水温在 $15 \sim 28^\circ\text{C}$ 之间(图 5), 为微生物的生长提供条件. pH 对湿地 TP 的去除贡献率为 10.24% ($P = 0.01$), pH 升高, 会增加土壤表面可变负电荷, 造成土壤 P 吸附位的减少, P 吸附量减少^[19]. 本研究中, 湿地系统 pH 值均随梯级湿地的增加而降低, 底泥对 TP 的吸附量也随之降低(图 3 和图 5).

3.2 污染物的去除途径

3.2.1 植物吸收

湿地植物在 N、P 去除方面扮演着举足轻重的

作用, 植物的存在可降低流速, 增加水力停留时间, 促进颗粒物沉降, 根系泌氧作用还为微生物的生长提供碳源和氧气^[20,21], Iamchaturapatr 等^[22]的研究表明植物湿地对 N、P 的去除率与对照相比提高 46%~53% 和 24%~32%. 由于设计工艺和地域的不同, 加之植物本身的生物学特性差异, 植物对 N、P 去除的贡献不尽一致. Pincam 等^[7]的研究认为香蒲对 N、P 的去除率高达 99% 和 80%, 植物吸收占湿地 N、P 去除的 20.7% 和 16.4%; 王丽莎等^[21]的研究认为绿狐尾藻和不同植物组合, 植物对 N、P 的吸收为 18.7% 和 12.1%; Gaballah 等^[6]的研究发现植物直接吸收对 N、P 去除的贡献一般不超过 10%. 本研究植物吸收占 N、P 去除的 19.1% 和 20.2%, 可能与绿狐尾藻生物量巨大有关, Liu 等^[23]的研究也认为湿地对 N、P 的去除效率与物种生物量显著相关, 植物生物量越大, N、P 吸收能力越强, N、P 的去除效果越明显. 但是, 植物对湿地 N、P 去除的影响不仅直接体现在 N、P 吸收, 更在于根系泌氧作用及为微生物生长提供碳源, 通过 N、P 平衡计算的其他途径对 N、P 的去除量占消纳总量的 61.1% 和 18.1% (表 6), 就可能与植物间接作用有关.



红线横线代表国家畜禽养殖业污染物排放标准, 蓝线代表城镇污水处理厂污染物排放二级标准

图4 进水和出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP和COD浓度动态

Fig. 4 Concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, TP, and COD in the influent and effluent

植物吸收 N、P 能力随季节变化明显, 张树楠等^[24]的研究发现植物 N、P 累积量季节变化明显, 春季开始逐渐增加, 夏季降至最低, 秋冬季逐步回升; 王丽莎等^[21]的研究也发现通过刈割植物的手段, 夏季植物收获 N、P 量低于秋冬季, 这与本研究结果相似(表 4 和表 5). 植物 N、P 积累量与生物量和 N、P 含量有关, 但是高温会限制根系泌氧作用的发生, 降低湿地 DO 浓度, 而低 DO 浓度可显著抑制水生植物的生长指标, 降低水生植物生物量^[16]; 植物对 N、P 的吸收也和温度相关, 并且在温暖的条件下(15 ~ 25℃)吸收效果最好^[25]. 本研究中, 季节变化对植物 N、P 含量的影响较小, N、P 含量随时间缓慢增加(表 2 和表 3), 但是绿狐尾藻不耐高温, 夏季生长受限, 部分甚至枯死, 生物量显著低于春秋季节($P < 0.05$)(图 1), 导致夏季绿狐尾藻 N、P 积累量较低.

3.2.2 底泥吸附

底泥是人工湿地重要的组成部分, 不仅为植物和微生物的生长提供载体, 而且可直接吸附 N、P, 是湿地 N、P 去除的重要途径^[10-12, 22-25]. 底泥对 N 的

吸附通过物理吸附和离子交换而实现, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 带正电, 底泥带负电, 在底泥表面静电引力下, 铵离子吸附于基质内; 铵离子还可与底泥内阳离子交换, 达到吸附铵的目的^[7, 8]. 底泥对 P 的吸附是 P 去除的主要途径, 基质可直接吸附湿地中不溶性磷酸盐, 而可溶性磷酸盐很容易与土壤中的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 等反应形成不溶性沉淀, 脱离水体^[16, 26]. 不同基质本身物理属性不同, N、P 吸附能力存在差异, Gaballah 等^[6]在比较黏土、陶瓷和混合黏土陶瓷对 N、P 的吸附能力时发现, 混合填料的吸附能力低于单一填料, 分别 [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 为: 1.42 和 0.13、1.7 和 0.14 与 1.1 和 0.1. He 等^[27]的研究发现, 沸石因其巨大的比表面积对 N、P 的吸附量高达 $1.84 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.23 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 本研究中, 底泥对 N、P 的吸附量较大为 $1.96 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.58 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 原因可能是本实验处理的养猪废水, 进水 N、P 负荷高, 且湿地已稳定运行超 1 a, 底泥 N、P 吸附量在实验初期已有较高本底值.

3.3 N、P 消纳容量分析

湿地系统对污染物的消纳容量受到植物、基质

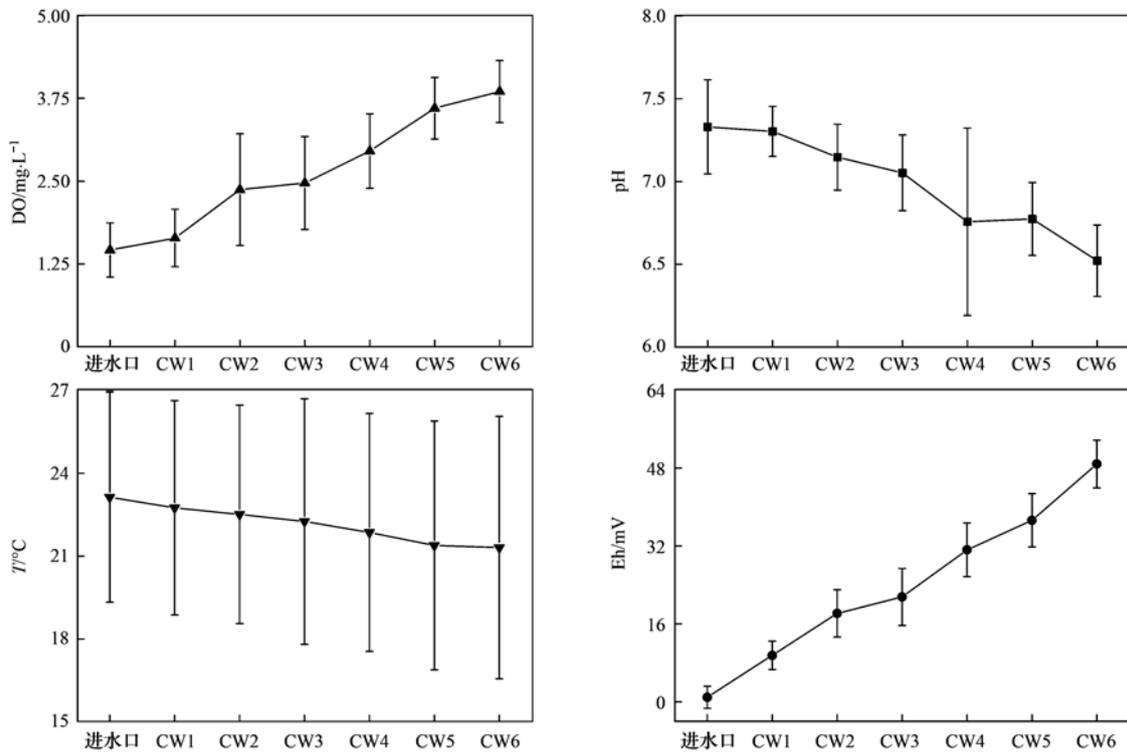


图 5 主要水质理化指标分析

Fig. 5 Analysis of the main physical and chemical indicators of water quality

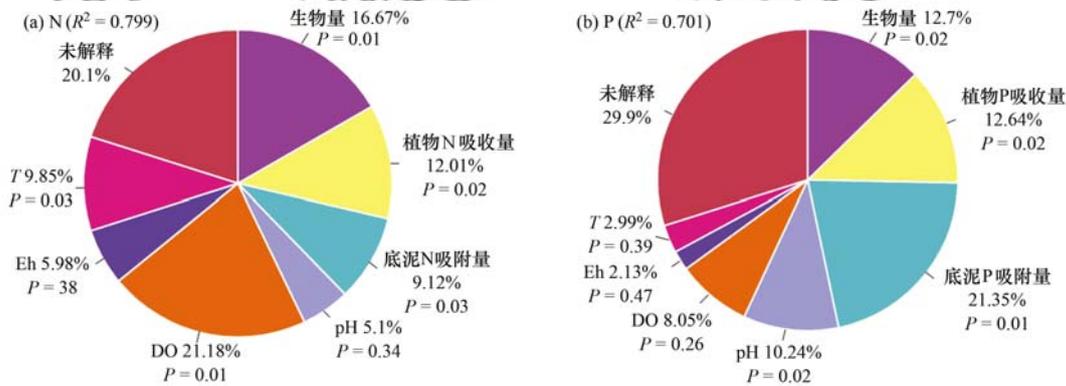


图 6 影响因子对 N、P 去除的贡献率

Fig. 6 Contribution rate of individual environmental factors to N and P removal

类型、污染负荷、停留时间、季节和地域差异等方面的影响,不同类型人工湿地对污染物的消纳差异很大^[17,18].刘长娥等^[28]在上海的研究结果表明,芦苇-水稻复合湿地对稀释低浓度养殖废水的 N 和 P 的消纳容量分别为 $2.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; Lee 等^[29]在中国台湾东平县设置水葫芦潜流湿地治理高负荷养猪废水,湿地 TN 消纳量高达 $17.78 \sim 23.43 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, TP 消纳量高达 $0.84 \sim 2.12 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 王迪^[30]在长沙采用绿狐尾藻表面流湿地治理稀释养猪废水, N、P 消纳容量分别在 $1.9 \sim 3.4 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.12 \sim 0.87 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间,远不及本研究 $9.92 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.94 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的消纳量,原因可能与本研究进水量更大,进水负荷更高有关,说明在亚热带地区

绿狐尾藻湿地治理高负荷污水 N 和 P 的消纳容量是可观的.

3.4 绿狐尾藻湿地治理养殖废水可行性分析

工程投资和运行管理费用是制约畜禽养殖企业污水治理的主要限制因素.多数工业化治污技术对养殖废水都有很好的净化效果,如生物膜法对养殖废水 COD 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率高达 79% 和 99%^[31]; 在氧气充足的条件下,活性污泥法对 N、P 的去除率高达 90% 以上^[32].且不断有新的处理技术出现,如光微生物燃料电池技术(MFCs),该技术将光合细菌和微藻作为阳极和阴极接种物构建成电池治理养殖废水,对 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 的去除率达 91.8%、90.2% 和 81.7%^[33]; UASB-SFSBR(分步进水序批式反应器)-MAP(磷酸铵镁结晶)处理工艺是通过

微曝气、氮浓缩与吹脱和磷化学结晶等一系列技术治理养猪废水,并实现 N、P 回收利用^[34]. 这些工业治污技术虽然占地面积小,治理效率也较高,但工程投资和运行费用高,并不适用于广大农村地区. 本研究绿狐尾藻湿地虽然占地面积大(1 597 m²),运行时间长(水力停留时间为 31 d),但运行费用低,操作简单,且污水可达标排放,收割后,绿狐尾藻还可作为青绿饲料进行产业化开发利用,实现废水治理生态效益与经济效益的双赢.

4 结论

(1) 在亚热带丘陵区,绿狐尾藻湿地系统对高负荷养猪废水具有很好的治理效果,NH₄⁺-N、TN、TP 和 COD 平均去除率均可达到 90% 以上,湿地出水远优于《国家畜禽养殖污水排放标准》(GB 18596-2001).

(2) 绿狐尾藻湿地植物 N、P 吸收量和底泥 N、P 吸附量除 8 月外,表现出随时间缓慢增加的趋势,绿狐尾藻 N、P 吸收量对湿地 N、P 消纳的贡献差异较小,但底泥吸附对 P 消纳的贡献远优于对 N 消纳的贡献.

(3) 植物 N 吸收(12.01%)和底泥 N 吸附(9.12%)对湿地 N 消纳贡献率都较小,而 DO 是湿地 N 去除主要影响因子(21.18%, $P = 0.01$),说明微生物的硝化反硝化作用可能是湿地 N 去除的关键;底泥 P 吸附是湿地 P 去除的主要途径(21.35%, $P = 0.01$).

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第二次全国污染源普查公报,2020 [EB/OL]. <http://www.eco.gov.cn/news/34155.html>, 2020-07-26.
- [2] 孟岑,李裕元,许晓光,等. 亚热带流域氮磷排放与养殖环境承载力实例研究[J]. 环境科学学报,2013,33(2): 635-643.
Meng C, Li Y Y, Xu X G, et al. A case study on non-point source pollution and environmental carrying capacity of animal raising industry in subtropical watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2): 635-643.
- [3] Liu F, Zhang S N, Wang Y, et al. Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 166: 596-604.
- [4] Zhang M M, Luo P, Liu F, et al. Nitrogen removal and distribution of ammonia-oxidizing and denitrifying genes in an integrated constructed wetland for swine wastewater treatment [J]. Ecological Engineering, 2017, 104: 30-38.
- [5] 张彩莹,王妍艳,王岩. 湿地植物齿果酸模对猪场废水净化作用研究[J]. 环境工程学报,2011,5(11): 2405-2410.
Zhang C Y, Wang Y Y, Wang Y. Study on purification of swine wastewater by wetland plants *Rumex dentatus* [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(11): 2405-2410.
- [6] Gaballah M S, Abdelwahab O, Barakat K M, et al. A novel horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Typha angustifolia* for treatment of polluted water [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(22): 28449-28462.
- [7] Pincam T, Jampeetong A. Treatment of anaerobic digester effluent using *Typha angustifolia* L.: growth responses and treatment efficiency [J]. Journal of Water and Environment Technology, 2020, 18(2): 105-116.
- [8] Luo P, Liu F, Liu X L, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* [J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 490-497.
- [9] Zhang S N, Xiao R L, Liu F. Effect of vegetation on nitrogen removal and ammonia volatilization from wetland microcosms [J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 363-369.
- [10] 刘铭羽,夏梦华,李远航,等. 3 种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程[J]. 环境科学,2019,40(8): 3650-3659.
Liu M Y, Xia M H, Li Y H, et al. Treatment of highly concentrated swine wastewater and its degradation processes using three matrix materials [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3650-3659.
- [11] 吴飞,陈家顺,刘锋,等. 饲料中添加绿狐尾藻对肥育猪生长性能、血清生化指标和胴体品质的影响[J]. 动物营养学报,2017,29(10): 3657-3665.
Wu F, Chen J S, Liu F, et al. Effects of dietary *Myriophyllum elatinoides* on growth performance, serum biochemical indexes and carcass quality of finishing pigs [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(10): 3657-3665.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002. 123-207.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999. 308-315.
- [14] Barca C, Troesch S, Meyer D, et al. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in constructed wetlands: two years of field experiments [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(1): 549-556.
- [15] 廖雪珂,严晗璐,王智源,等. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试[J]. 环境科学,2020,41(12): 5509-5517.
Liao X K, Yan H L, Wang Z Y, et al. Advanced treatment of tail water by pilot-scale horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands in low-temperature season [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5509-5517.
- [16] 徐德福,潘潜澄,李映雪,等. 生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响[J]. 环境科学,2018,39(7): 3187-3193.
Xu D F, Pan Q C, Li Y X, et al. Effect of biochar on root morphological characteristics of wetland plants and purification capacity of constructed wetland [J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3187-3193.
- [17] Zhang S N, Liu F, Xiao R L, et al. Emissions of NO and N₂O in wetland microcosms for swine wastewater treatment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(24): 19933-19939.
- [18] Luo P, Liu F, Zhang S N, et al. Nitrogen removal and recovery from lagoon-pretreated swine wastewater by constructed wetlands under sustainable plant harvesting management [J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 247-254.

- [19] 马良, 徐仁扣. pH和添加有机物料对3种酸性土壤中磷吸附-解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(6): 596-599.
Ma L, Xu R K. Effects of regulation of pH and application of organic material on adsorption and desorption of phosphorus in three types of acid soils [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, **26**(6): 596-599.
- [20] 黄磊, 梁银坤, 梁岩, 等. 生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1280-1286.
Huang L, Liang Y K, Liang Y, et al. Influences of biochar application on root aerenchyma and radial oxygen loss of *Acorus calamus* in relation to subsurface flow in a constructed wetland [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1280-1286.
- [21] 王丽莎, 李希, 甘蕾, 等. 亚热带丘陵区湿地水生植物组合模式拦截氮磷的研究[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(9): 1577-1583.
Wang L S, Li X, Gan L, et al. Study on the aquatic plant combination patterns for intercepting nitrogen and phosphorus in wetland of subtropical hilly region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(9): 1577-1583.
- [22] Iamchaturapatr J, Yi S W, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2007, **29**(3): 287-293.
- [23] Liu X H, Guo X C, Liu Y, et al. A review on removing antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater by constructed wetlands: performance and microbial response[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112996.
- [24] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4516-4522.
Zhang S N, Xiao R L, Liu F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches [J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4516-4522.
- [25] Li X, Zhang M M, Liu F, et al. Abundance and distribution of microorganisms involved in denitrification in sediments of a *Myriophyllum elatinoides* purification system for treating swine wastewater[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(22): 17906-17916.
- [26] 潘乐, 茆智, 董斌, 等. 人工湿地对稻田氮磷污染的去除试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, **44**(5): 586-589, 598.
Pan L, Mao Z, Dong B, et al. Experimental analysis of N and P removal effect of constructed wetlands at paddy field [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, **44**(5): 586-589, 598.
- [27] He S B, Yan L, Kong H N, et al. Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water [J]. Pedosphere, 2007, **17**(4): 522-528.
- [28] 刘长娥, 周胜, 孙会峰, 等. 复合人工湿地处理低浓度畜禽养殖废水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(7): 1416-1424.
Liu C E, Zhou S, Sun H F, et al. Purification performance of combined constructed wetlands on livestock wastewater with low concentration of pollutants [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(7): 1416-1424.
- [29] Lee C Y, Lee C C, Lee F Y, et al. Performance of subsurface flow constructed wetland taking pretreated swine effluent under heavy loads[J]. Bioresource Technology, 2004, **92**(2): 173-179.
- [30] 王迪. 人工湿地组合系统对农村污水净化效果研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Wang D. Interception effect of constructed wetland system on rural sewage [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [31] 张寒冰, 黄凤莲, 周艳红, 等. 生物膜法处理养殖废水的研究[J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 26-29.
Zhang H B, Huang F L, Zhou Y H, et al. Treatment of aquaculture wastewater by the biological film process [J]. Ecology and Environment, 2005, **14**(1): 26-29.
- [32] 刘国华, 刘禹琛, 陈燕, 等. 低DO对活性污泥系统碳和氮去除影响的研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(6): 2503-2512.
Liu G H, Liu Y C, Chen Y, et al. Effects of low dissolved oxygen on carbon and nitrogen removal in activated sludge process [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(6): 2503-2512.
- [33] 吴义诚, 王泽杰, 刘利丹, 等. 利用光微生物燃料电池实现养猪废水资源化利用研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 456-460.
Wu Y C, Wang Z J, Liu L D, et al. Resource recovery of swine wastewater using photo microbial fuel cells [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(2): 456-460.
- [34] 王亮, 陈重军, 陈英旭, 等. 规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 979-985.
Wang L, Chen C J, Chen Y X, et al. Effect of pilot UASB-SFSBR-MAP process for the large scale swine wastewater treatment [J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 979-985.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)